

なぜ運動による覚醒レベルの上昇は 認知パフォーマンスを高めるのか？

電気通信大学 安藤 創一

Why does Exercise-Induced Increase in Arousal Level Improve Cognitive Performance?

by

Soichi Ando

The University of Electro-Communications

ABSTRACT

A large number of studies have shown that acute exercise improves cognitive performance. Increase in arousal level has been suggested to be associated with cognitive improvement induced by acute exercise. However, it is still unclear which parts of the brain are responsible for increase in arousal level. The first purpose of this study was to clarify the brain areas involved in the increase in arousal level after acute exercise. The second purpose was to test if the increase in arousal level is associated with altered functional connectivity with the brain areas. Eighteen young male participants were recruited in the experiment. Experiments were performed on two separate days in a randomized crossover design. In the Exercise condition, the participants cycled an ergometer at 40% peak oxygen uptake for 30 minutes. In the Control condition, the participants rested for 30 minutes without exercise. They performed cognitive tasks before and after acute exercise or resting period, and fMRI images were acquired during the cognitive task. Cognitive task was a Go/No-Go task that requires executive function. Cognitive performance was assessed by reaction time and response accuracy. After exercise, arousal level increased and cognitive performance improved. The increase in arousal level was associated with increased activations of the left middle frontal gyrus, the right frontal pole, and the right dorsal

anterior cingulate cortex. The increased activations were accompanied by increase in functional connectivity among these areas. These results suggest that the increase in arousal level is associated with the activations of the prefrontal cortex, the frontal pole, and the cingulate cortex. The present results also suggest that neural network of these brain areas appears to contribute to cognitive improvement induced by acute exercise.

要 旨

本研究の目的は、運動による覚醒レベルの上昇が認知パフォーマンスを向上させるメカニズム解明のために、運動による覚醒レベルの向上に関わる脳領域を同定すること、脳領域間の機能的結合の変化が覚醒レベルの変化に関与するかを明らかにすることであった。18名の実験参加者は、最高酸素摂取量の40%の運動強度での運動前後、および安静の前後に認知課題を行い、fMRIを用いて脳活動を撮像した。運動後に覚醒レベルは上昇し、認知パフォーマンスは向上した。運動による覚醒レベルの変化は、準備刺激に対する左下前頭回、右前頭極、および右背側帯状回皮質の活動増加と関係がみられた。さらに、覚醒レベルの変化は、これらの領域間での機能的結合の増加を伴っていた。本研究から、運動による覚醒レベルの上昇には、前頭前野、前頭極、帯状回皮質の領域間の神経ネットワークが関与し、この領域間のネットワークが高まるのが認知パフォーマンスの向上に貢献することが示唆された。

緒 言

これまでの研究から、一過性の運動が認知パフォーマンスを向上させることが知られている。多くの先行研究では、運動による認知パフォーマンスの向上は、覚醒レベルの適度な上昇によりもたらされると説明されてきた¹⁻⁵⁾。しかし、覚醒レベルとは概念的なものであり、一過性の運動がどのように覚醒レベルを向上させるのかについて

は、明確な回答は得られていない。そのため、一過性の運動がなぜ認知パフォーマンスを向上させるのかについては、完全には明らかになっていないのが現状である。

近年、Byunら(2014)は、機能的近赤外線分光法(fNIRS)を用いて、運動後のストループ課題のパフォーマンス向上に関係する脳領域を検討した。さらに、覚醒レベルを定量的に評価することが可能な質問紙(二次元気分尺度)を併せて用いることで、運動による覚醒レベルの上昇と認知パフォーマンスとの関係についても検討した。その結果、運動による認知パフォーマンスの向上に背外側前頭前野および前頭極の脳活動の賦活が関与することが示された⁶⁾。さらに、覚醒レベルの上昇と認知パフォーマンスの向上を反映するストループ干渉の向上との間に関係がみられた。これらの結果は、運動による覚醒レベルの上昇が背外側前頭前野と前頭極の脳活動を高めることで、認知パフォーマンスが向上することを示唆している。しかしながら、fNIRSによる測定は脳の表層部に限られている。そのため、運動による覚醒レベルの上昇と関係がある脳深部の領域との関係については明らかになっていない。

そこで本研究では、脳深部の脳活動の計測が可能である機能的核磁気共鳴断層画像(fMRI)を用いて、運動による覚醒レベルの上昇と関係のある脳領域を明らかにすることを目的とした。さらに本研究では、血中酸素濃度依存性信号の低周波性ゆらぎ成分の時間的相関関係を反映する機能的結合⁷⁾についても測定した。運動の前後で脳の

機能的結合を測定することで、脳の領域間のネットワークの結びつきの強さを定量的に評価することが可能となる。これにより、一過性の運動による覚醒レベルの上昇と関係のある脳領域だけでなく、覚醒レベルの変化と関係のある脳内のネットワークを明らかにすることが可能になると考えられる。本研究の目的は、運動による覚醒レベルの上昇が認知パフォーマンスを向上させるメカニズム解明のために、1) 運動による覚醒レベルの向上に関わる脳領域を同定すること、2) 脳領域間の機能的結合の変化が覚醒レベルの変化に関与するかを明らかにすることであった。

1. 研究方法

1. 1 参加者

本実験には健康な男性 19 名が実験に参加した。しかし、認知課題の正確性が他の参加者と比較して著しく低い参加者が 1 名いたため、この参加者のデータはその後の解析から除外し、18 名のデータで解析を行った（平均値 ± 標準偏差、年齢 = 22.0 ± 1.4 yr, 身長 = 1.74 ± 0.05 m, 体重 = 67.9 ±

10.3 kg）であった。実験は電気通信大学ヒトを対象とする実験に関する倫理委員会、および首都大学東京荒川キャンパス研究倫理委員会の承認を受けて行った。実験参加者には事前に測定項目や安全性に関する十分な説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。

1. 2 実験手順

実験は 3 日間に分けて行った。実験 1 日目に自転車エルゴメーター（エアロバイク XL75III, KONAMI 社製）を用いて漸増負荷運動を行い、最高酸素摂取量を決定した。運動負荷は 10W から始め、1 分ごとに 20W ずつ負荷を増加させた。参加者の心拍数が 160 拍に到達したところで運動を中止し、220 から年齢を引いた値を最高心拍数として最高酸素摂取量を推定した。本研究の実験参加者の最高酸素摂取量は 44.5 ± 7.4 ml/kg/min. であった。

実験 2 日目および 3 日目には、運動条件と対照条件の 2 つの条件で実験を行った。図 1 に実験のプロトコルを示す。運動条件では、最高酸素

1) 運動条件



2) 対照条件



図1 実験のプロトコル

摂取量の40%に相当する運動強度(100±18w)で自転車エルゴメーターを用いた運動を30分間行った。対照条件では、運動は行わずに座位安静を30分間保った。運動あるいは安静の前後で質問紙による覚醒レベルの評価、血圧、心拍数、主観的運動強度(RPE)を測定した後に認知課題を行った。運動後の測定は心拍数が安静時の水準に近い値に戻ってから行った。認知課題中には脳活動をfMRIにより撮像した。

1. 3 測定項目

1. 3. 1 認知課題およびfMRI測定

認知課題には実行機能を評価するGo/No-Go課題⁸⁾を用いた。Go/No-Go課題は、先行研究⁹⁾をもとに、測定1回あたりGo試行、No-Go試行をそれぞれ30試行ずつの計60試行とした。1試行は、9秒間の待機画面(黒色の背景)、2秒間の反応準備のための刺激準備画面(緑色の四角形)、1秒間の反応刺激画面(赤色、青色、橙色、紫色のいずれかの四角形)の計12秒で構成した。参加者には、Go試行の色が呈示された際には、速やかに右手の人差し指でボタンを押し、No-Go試行の色が呈示された際には、ボタンを押さないように指示した。半数の参加者は赤色と青色をGo試行とし、残りの半数の参加者は橙色と紫色をGo試行とした。認知課題のパフォーマンスは、反応時間と反応の正答率から評価した。Go試行時に反応をしなかった試行、およびNo-Go試行時に反応をした試行をエラー試行とした。認知課題中には、T/R-headコイルを使用した3.0T-MRI装置Achieva(PHILIPS社製)を用いて脳活動を撮像した。fMRIによる撮像にはGRE型EPIシークエンスを用い、総スライス数は360ボリュームとした。視覚刺激の呈示にはゴーグル型視覚刺激呈示装置を用い、反応動作にはボタン型レスポンスパッドを用いた。

1. 3. 2 覚醒レベル、心拍数、血圧、主観的運動強度(RPE)

覚醒レベルの評価は、質問紙(二次元気分尺度)¹⁰⁾を用いて行った。心拍数は、心拍計(V800, Polar社製)を用いて測定した。心拍数は運動の前後に加えて、運動条件では運動中にも測定した。血圧は、血圧計(HEM-1000, オムロン社製)を用いて測定した。RPE¹¹⁾は、運動の前後に加えて、運動条件では運動終了直前に記録した。

1. 4 データ解析および統計検定

認知パフォーマンス、覚醒レベル、心拍数、血圧、RPEの結果に対しては、分散分析を行った。その後の検定には対応のあるt検定を用い、ボンフェローニの補正を行った。fMRIのデータ解析には、解析ソフトウェアであるSPM12を用いた。事象関連モデルにより、反応準備、Go試行、No-Go試行のそれぞれに特異的に活動が変化した領域を算出し、覚醒レベルの変化との関係がみられた領域を検出した。次に、CONNを用いて、覚醒レベルの向上に関わる脳領域をseedとして機能的結合を算出した。そして、覚醒レベルの変化と機能的結合の変化との間に関係がみられた脳領域を検討した。データはすべて平均値と標準偏差で示し、有意水準は5%未満に設定した。

2. 研究結果

2. 1 認知パフォーマンス

図2に認知パフォーマンスの結果を示す。運動条件では、反応時間(RT)に短縮がみられた($p < 0.001$)。対照条件では、変化はみられなかった。正答率は、実験を通じて高い値であり、条件間および運動、安静の前後で差はみられなかった(運動条件、運動前:98.0±3.4%, 運動後:98.1±2.3%; 対照条件、安静前:99.0±1.7%, 安静後:98.3±2.4%)。

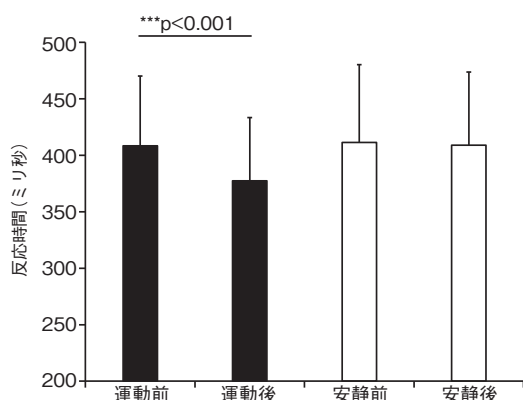


図2 運動条件と対照条件での反応時間の変化

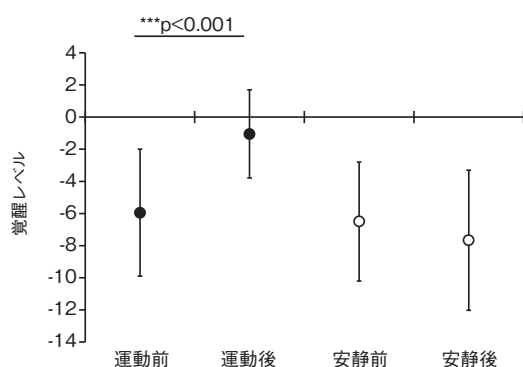


図3 運動条件と対照条件での覚醒レベルの変化

2. 2 覚醒レベル, 血圧, 心拍数, RPE,

図3に覚醒レベルの結果を, 表1に血圧, 心拍数, RPEの結果を示す. 運動条件では, 覚醒レベルに上昇がみられた($p < 0.001$). 対照条件では, 覚醒レベルに変化はみられなかった. 収縮期血圧, 拡張期血圧, RPEは, 条件間および運動, 安静の前後で差はみられなかった. 運動条件の心拍数は, 運動後に運動前と比較して高い値を示した ($p < 0.001$). 対照条件では心拍数に変化はみられなかった. 運動中には, 心拍数およびRPEに増加

表1 血圧, 心拍数, RPEの変化

	運動前	運動中	運動後	安静前	安静後
収縮期血圧, mmHg	116.7 ± 11.9		115.8 ± 13.2	115.1 ± 9.6	115.0 ± 7.9
拡張期血圧, mmHg	67.3 ± 8.6		67.3 ± 8.5	64.8 ± 7.4	66.4 ± 5.8
心拍数, bpm	66.8 ± 9.4	127.1 ± 15.7 ***	75.1 ± 11.3 ***	63.8 ± 10.6	61.5 ± 9.2
RPE	7.2 ± 1.2	12.4 ± 1.8 ***	7.5 ± 1.5	7.4 ± 1.6	7.2 ± 1.5

*** $p < 0.001$, 運動前との比較

がみられた ($p < 0.001$).

2. 3 覚醒レベルと認知パフォーマンスとの関係

図4に, 覚醒レベルの変化と認知パフォーマンス (RTの変化) との関係を示す. 覚醒レベルの上昇とRTの短縮との間に負の相関がみられた ($r = -0.66, p < 0.001$). この結果は, 覚醒レベルの上昇と認知パフォーマンスとの間に関係があることを示している.

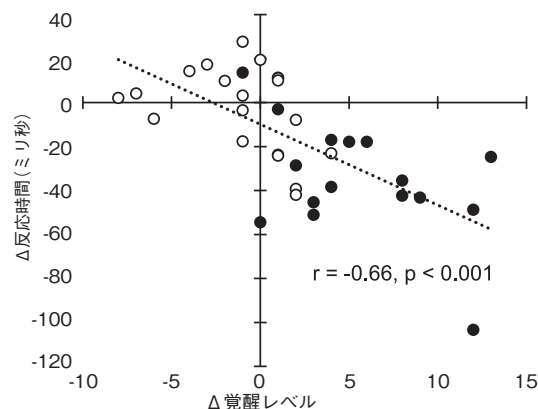


図4 覚醒レベルの変化と反応時間の変化との関係

2. 4 覚醒レベルの変化と脳活動

運動前後の覚醒レベルの変化と関係がみられた脳領域を算出した結果, 覚醒レベルの変化は, 反応準備に対する左下前頭回 ($r = 0.63, p = 0.005, \text{uncorrected}$), 右前頭極 ($r = 0.680, p = 0.002, \text{uncorrected}$), および右背側帯状回皮質 ($r = 0.670, p = 0.002, \text{uncorrected}$) の活動変化と正の相関がみられた.

2. 5 機能的結合の変化

左下前頭回, 右前頭極, 右背側帯状回皮質を seed として, 運動の前後で機能的結合の変化を算出し, 覚醒レベルの変化と機能的結合の変化との間に関係がみられた領域を検討した. その結果, 左下前頭回と右被殻 ($r=0.67, p=0.007$), 右下前頭回 ($r=0.53, p=0.04$) との間の機能的結合の変化と覚醒レベルの変化に正の相関がみられた. さらに, 右前頭極と右下前頭回 ($r=0.53, p=0.04$), 後帯状回皮質 ($r=0.52, p=0.04$) との間の機能的結合の変化と覚醒レベルの変化との間に正の相関がみられた.

3. 考 察

これまでにも, 一過性の運動による認知パフォーマンスの向上に覚醒レベルの上昇が関与することが示唆されてきた. 本研究でも, 覚醒レベルの上昇と認知パフォーマンスの向上との間に関係がみられた. しかしながら, 運動による覚醒レベルの上昇に関わる神経基盤は十分に明らかにされてこなかった. 本研究では, 脳深部の活動を計測することが可能な fMRI を用いることで, 運動による覚醒レベルの上昇に関わる脳領域の同定を行うことを目的とした. その結果, 運動による覚醒レベルの上昇と, 反応準備に対する下前頭回, 前頭極, 後帯状回皮質の活動が関係することが明らかとなった. これは, 運動による覚醒レベルの上昇が背外側前頭前野と前頭極の脳活動を高めることで, 認知パフォーマンスが向上することを示唆した先行研究の結果⁶⁾を支持するものであると言える. さらに, 本研究はこれらの領域に加えて, 後帯状回皮質の関与を示唆したという点で, 先行研究の知見を広げるものであると言える.

さらに本研究では, 運動による覚醒レベルの上昇と機能的結合の変化について検証した. その結果, 覚醒レベルの上昇は, 前述した前頭前野, 前頭極, および後帯状回皮質の領域間における機能

的結合の変化と関係がみられた. これらの結果は, 運動による覚醒レベルの上昇がこれらの脳領域内でのネットワークの変化と密接な関係を持っていることを示していると考えられる. 前頭前野が認知機能と関係があることは広く知られている¹²⁾. 一方, 帯状回皮質の脳活動は素早い反応で鍵となる領域である可能性が報告されている¹³⁾. 本研究でみられた, 後帯状回皮質が覚醒レベルの上昇に関与するという結果は, 帯状回皮質の活動が反応の早さで評価される認知パフォーマンスの向上に関係することを示唆しているのかもしれない. 本研究の結果から, 運動による覚醒レベルの上昇には, 前頭前野, 前頭極, 帯状回皮質の領域間の神経ネットワークが関与し, この領域間のネットワークが高まることで認知パフォーマンスの向上に貢献することが示唆された.

本研究では, 機能的結合の解析から左下前頭回の活動変化と, 右被殻との間の機能的結合の変化との間に関係がみられた. この結果は, 運動による覚醒レベルの上昇に大脳基底核の一部である被殻も関わる可能性を示唆する. 被殻は黒質緻密部を起源とするドーパミン神経系の投射を受けている. これまでに直接的なエビデンスはないものの, 運動による認知パフォーマンスの向上にドーパミン神経系やノルアドレナリン神経系が関与していることが示唆されている^{3,5)}. したがって, 本研究の結果は, 運動による覚醒レベルの上昇, 認知パフォーマンスの向上にドーパミン神経系が, 少なくとも部分的には, 関与することを示唆しているのかもしれない.

本研究は, 運動が覚醒レベルの上昇をもたらす神経基盤に対して, 新たな知見を提供するものであると考えられる. しかしながら, 本研究での議論は相関関係をもとに進められている. 相関関係は因果関係を示すものではないため, 運動による覚醒レベルの上昇の神経基盤を解明するためには, さらなる研究が必要であると考えられる.

4. まとめ

本研究では fMRI を用いて、運動による覚醒レベルの上昇が認知パフォーマンスの向上させるメカニズムの解明につながる知見を得るために、運動による覚醒レベルの向上に関わる脳領域を同定すること、脳領域間の機能的結合の変化が覚醒レベルの変化に関与するかを明らかにすることを目的とした。本研究から、運動による覚醒レベルの上昇には、前頭前野、前頭極、帯状回皮質の領域間の神経ネットワークが関与し、この領域間のネットワークが高まることが認知パフォーマンスの向上に貢献することが示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり首都大学東京の妹尾淳史先生に多大なご協力をいただきました。ここに記して、心より感謝の意を表します。

文 献

- 1) Lambourne K., Tomporowski P., The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Res.*, 1341:12-24(2010)
- 2) Chang Y.K., Labban J.D., Gapin J.I., Etnier J.L., The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Res.*, 1453:87-101(2012)
- 3) Ando S., Komiyama T., Sudo M. et al., The interactive effects of acute exercise and hypoxia on cognitive performance: a narrative review. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, (2019)
- 4) Brisswalter J., Collardeau M., Rene A., Effects of

acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Med.*, 32(9) :555-66(2002)

- 5) McMorris T., Beyond the catecholamine hypothesis for an acute exercise-cognition interaction: a neurochemical perspective. In: T McMorris editor. *Exercise-Cognition Interaction: Neuroscience Perspective*. London: Elsevier; pp. 65-103(2016)
- 6) Byun K., Hyodo K., Suwabe K. et al., Positive effect of acute mild exercise on executive function via arousal-related prefrontal activations: an fNIRS study. *Neuroimage.*, 98:336-45(2014)
- 7) Biswal B., Yetkin F.Z., Haughton V.M., Hyde J.S., Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn. Reson. Med.*, 34(4) :537-41(1995)
- 8) Ando S., Hatamoto Y., Sudo M., Kiyonaga A., Tanaka H., Higaki Y., The effects of exercise under hypoxia on cognitive function. *PLoS One.*, 8(5) :e63630(2013)
- 9) Watanabe J., Sugiura M., Sato K. et al., The Human Prefrontal and Parietal Association Cortices Are Involved in NO-GO Performances: An Event-Related fMRI Study. *NeuroImage.*, 17(3) :1207-16(2002)
- 10) Sakairi Y., Nakatsuka K., Shimizu T., Development of the Two-Dimensional Mood Scale for self-monitoring and self-regulation of momentary mood states. *Japanese Psychological Research.*, 55(4) :338-49(2013)
- 11) Borg G., Simple rating for estimation of perceived exertion. In: B G. editor. *Physical Work and Effort*. New York: Pergamon, pp. 39-46(1975)
- 12) Pessoa L., On the relationship between emotion and cognition. *Nat. Rev. Neurosci.*, 9(2) :148-58(2008)
- 13) Naito E., Kinomura S., Geyer S., Kawashima R., Roland P.E., Zilles K., Fast reaction to different sensory modalities activates common fields in the motor areas, but the anterior cingulate cortex is involved in the speed of reaction. *J. Neurophysiol.*, 83(3) :1701-9(2000)